

電子ビーム近接露光用マスクの製作方法及びマスク

MANUFACTURING METHOD OF MASK FOR ELECTRON BEAM PROXIMITY EXPOSURE AND MASK

発明の背景

5 発明の属する技術分野

本発明は、半導体集積回路などの製作工程で使用される微細パターンを露光する露光装置で使用されるマスクの製造方法に関し、特に露光パターンに対応する開口を有するマスクを半導体ウエハなどの試料の表面に近接して配置し、マスクに電子ビームを照射して開口を通過した電子ビームで露光を行う電子ビーム近接露光装置で使用するマスクの製造方法に関する。

関連技術の説明

半導体集積回路の高集積化が図られており、回路パターンの一層の微細化が望まれている。現在、微細化の限界を規定しているのは主として露光装置であり、光学式露光装置であるステッパでは、光源の短波長化、NA（開口数）の増加、位相シフト法の採用など各種の方策が取られている。しかし、これ以上の微細化は、製造コストの飛躍的な増大などの各種の問題がある。そこで、電子ビーム直接描画装置やX線露光装置などの新しい方式の露光装置が開発されているが、安定性、生産性及びコストなどの面で多くの問題がある。

電子ビーム近接露光方式は、その露光原理の単純さから “High Throughput Submicron Lithography with Electron Beam Proximity Printing” (H. Bohlen et al., Solid State Technology, September 1984, pp. 210-217) (以下、文献1と称する) に示される如く、古くから研究開発が行なわれたが、電子ビーム特有のプロクシミティ効果の除去が困難で実用性がないと考えられていた。

米国特許第 5,831,272 号（日本特許第 2951947 号に対応）及び “Low energy electron-beam proximity projection lithography: Discovery of missing link” (Takao Utsumi, J.

Vac. Sci. Technol. B 17(6), Nov/Dec 1999, pp. 2897-2902)は、この困難を解決して、量産レベルで超微細加工用に使用可能な電子ビーム近接露光装置を開示している。

図1は、米国特許第5,831,272号に開示された電子ビーム近接露光装置を実現する場合の基本構成を示す図である。この図を参照して、米国特許第5,831,272号に開示された電子ビーム近接露光装置について簡単に説明する。図1に示すように、コラム10内には、電子ビーム15を発生する電子ビーム源14と整形アパーチャ16と電子ビーム15を平行ビームにする照射レンズ18とを有する電子銃12、対となる主偏向器22、24を含み、電子ビームを光軸に平行に走査する走査手段20、露光するパターンに対応する開口を有する試料用マスク（以下、単にマスクと称する）30、及び表面にレジスト層42が形成された試料（半導体ウェハ）40が設けられている。マスク30は、厚い外縁部分34内の中央に開口の形成された薄い膜32を有しており、試料40は表面がマスク30に近接するように配置される。この状態で、マスクに垂直に電子ビームを照射すると、マスクの開口を通過した電子ビームが試料40の表面のレジスト層42に照射される。走査手段20により電子ビーム15を偏向して（図1のA、B、Cは3箇所に向向されたビームを示す）、マスク30上の薄い膜32の全面を走査すると、マスク30のすべての開口パターンが露光されることになる。走査手段20には、電子ビームを僅かに傾斜するための副偏向器51、52が設けられており、マスク30と試料40の位置合わせと、マスクの歪と試料の歪による露光位置のずれを補正するのに使用される。

電子ビーム近接露光用のマスクは、任意のパターンを露光できる従来の電子ビーム露光装置を使用してパターンを露光することにより製作されるが、このような装置で高精度のパターンを露光するには非常な長時間を要し、その分マスクのコストは高くなる。

半導体集積回路は1品種の生産量が非常に多く、1つのマスクが多数回の露光に使用される。電子ビーム近接露光用のマスクは、非常に薄い膜に開口を形成したステンスルマスクであり、電子ビームが照射されるためある程度の劣化が避けられず、最初にマスクが汚染され、パターン転写が不正確となる。はなはだしい場合には、開口以外の部分の膜がなくなり、白欠陥を生じるという問題を発生する。劣化の程度は電子ビームの照射量に応じて増大するので、マスクの耐久性が大きな問題である。マスク

の耐久性が不十分で、露光できる回数が少ない場合には、高価なマスクを多数作成する必要があり、半導体装置の製造コストが高くなるという問題が生じる。

マスクの汚染は、試料表面に形成されたレジスト層に電子ビームを照射するとその表面からレジスト分子などが若干ではあるが散乱することによって発生する。実際、
5 マスクは試料に近接して配置されるので、これらの分子がマスク表面に付着するとチャージアップして電界を生じ、電子ビームの照射に誤差を生じる。そこで、オゾンアッシングなどで定期的にマスク表面を洗浄する必要があるが、このような洗浄処理もマスクを劣化させるので、上記と同様にマスクの耐久性を低下させ、半導体装置の製造コストが高くなるという問題が生じる。

発明の概要

本発明は、このような問題に鑑みてなされたもので、低コストで電子ビーム近接露光用のマスクを製作する方法の実現を目的とする。

本願発明者は、電子ビーム近接露光装置は等倍の露光装置であり、露光されるパターンはマスクのパターンと同一であり、電子ビーム近接露光装置を使用してマスクを複製できる点に着目した。
15

本発明の電子ビーム近接露光用マスクの製作方法は、平行な電子ビームを出射する電子ビーム源と、前記電子ビームの経路中に配置され、開口を有する試料用マスクと、試料を保持して移動するステージとを備え、前記試料用マスクは前記試料の表面に近接して配置され、前記試料用マスクの開口を通過した電子ビームで、前記試料の表面
20 に前記開口に対応するパターンを露光する、電子ビーム近接露光装置で使用される前記試料用マスクの製作方法であって、前記試料用マスクと同一パターンの開口を有するマスタマスクを製作する工程と、前記マスタマスクを使用して前記マスタマスクと同一開口パターンを電子ビーム近接露光方法で露光して子マスクを製作する工程と、を備え、前記子マスクが前記試料用マスクとして使用されることを特徴とする。

25 生産量が非常に多く、マスクの耐久性が不十分な場合には、マスタマスクを使用した露光回数が非常に多くなる場合があり得る。このような場合には、マスタマスクによる露光回数を少なくするために、マスタマスクから複製した子マスクをマスタマス

クとして使用して更なる子マスク（孫マスク）を複製して、実際の試料の露光には孫マスクを使用するようにしてもよい。子マスクをマスタマスクとして使用して更なる子マスクを製作する工程は、1工程とは限らず、更に多数の段階で行うことも可能である（即ち、孫マスクをマスタマスクとして使用して曾孫マスクを（以下同様）製作してもよい）。

電子ビーム近接露光用マスクを製作する場合には、薄い板の一方の表面に開口パターンに対応する穴を、マスクの最終的な膜厚以上の深さで形成した後、他方の表面からマスク部全面をエッチングしてマスクの最終的な膜厚になるまで加工することにより行う。そのため、マスタマスクは子マスクに向き合う側から露光され、子マスクは試料又は孫マスクに向き合う側から露光されることになるので、1回の露光で製作されたパターンは前のパターンを左右反転したパターンとなる。そこで、マスタマスク又は子マスクから子マスクを製作する工程数を n 回とした時には、最初のマスタマスクの露光を含めて $n+1$ 回の露光、すなわちパターンの反転が行われることになるので、 $n+1$ が奇数の時には、マスタマスクに露光するパターンは試料上のパターンを左右反転したパターンとし、 $n+1$ が偶数の時には、マスタマスクに露光するパターンは試料上のパターンの非反転のパターンとする。

上記のように、電子ビーム近接露光用マスクは非常に薄い膜であるが、非常に高い膜の平面度が要求される。そこで、膜の表面に収縮する方向に力が働く薄い膜を形成し、マスクの周囲の厚い部分から薄い膜の部分を引っ張る応力がかかるようにする必要がある。しかし、この応力用の膜により、微少ではあるが開口パターンに歪が生じ、実際の開口パターンと所望のパターンとの間にずれが生じる。

米国特許第 5,831,272 号などに開示されているように、電子ビーム近接露光装置では、マスクに照射する電子ビームの方向を調整することにより、マスクの小さな歪であれば補正できる。そこで、マスタマスクを製作した時には、そのパターンのずれを測定し、ずれの分を補正して子マスクの露光を行うことが望ましい。更に、正しいパターンを露光した時に子マスクで発生する歪が予測できる時には、マスタマスクに実際の歪に加えて、子マスクで発生すると予測される歪も合わせて補正することが望ましい。

マスタマスク及び子マスクの材料や形状が同一である場合には、歪の量は主として開口パターンにより決定される。そこで、正しいパターンが露光された時に子マスク

で発生する歪をマスタマスクの歪と同じであると予測される場合には、補正量をマスタマスクのずれの2倍とすれば、できあがった子マスクで発生すると予測される歪も補正できるので、歪のない子マスクが得られることになる。

図面の簡単な説明

5 The nature of this invention, as well as other objects and advantages thereof, will be explained in the following with reference to the accompanying drawings, in which like reference characters designate the same or similar parts throughout the figures and wherein:

図1は、電子ビーム近接露光装置の基本構成を示す図であり；

図2は、本発明の基本概念を説明する図であり；

図3は、本発明の実施の形態で使用する電子ビーム近接露光装置の構成を示す図であり；

図4(A)は、電子ビーム近接露光装置で使用するマスクを示す図であり、図4(B)は、図4(A)の4(B)－4(B)線に沿った断面図であり；

図5(A)、5(B)、5(C)及び5(D)は、本発明の実施の形態におけるマスタマスクから子マスクを製作する方法を示す図であり；

図6は、電子ビーム近接露光装置で使用するマスクに応力用の層を付加した構造を示す断面図であり；

図7は、電子ビーム近接露光装置においてマスクの歪を補正して露光する方法を説明する図であり；

20 図8は、マスクにおいて発生した歪の補正を説明する図であり；

図9は、正しいパターンを露光した場合にも発生すると予測される歪も含めて補正する方法を説明する図である。

好ましい実施の形態の詳細な説明

図2は、本発明の基本原理を説明する図である。

25 図2において、参照番号101は、任意のパターンを露光できる従来の電子ビーム

露光装置であり、この電子ビーム露光装置 101 を使用して試料に露光するパターンと同一のパターンを露光した後、現像及びエッチングなどの処理を行ってマスタマスク 111 を製作する。参照番号 102 は、マスク複製用の電子ビーム近接露光装置であり、図 1 に示した米国特許第 5,831,272 号に開示された構成と同様の構成を有する。

- 5 マスク複製用の電子ビーム近接露光装置 102 のマスク 30 としてマスタマスク 111 を使用して露光を行い、多数 (N 個) の子マスク 30A ~ 30N を製作する。この子マスク 30A ~ 30N を、電子ビーム近接露光装置 103A ~ 103N に装着して、試料 (半導体ウエハ) への露光を行う。ここでは、試料の露光に使用する電子ビーム近接露光装置が複数台あるように示したが、1 台の電子ビーム近接露光装置で、子マ
10 スクが劣化して使用できなくなった場合に、別の子マスクを使用する場合もある。

図 3 は、本発明の第 1 の実施の形態の電子ビーム近接露光装置の構成を示す図であり、この装置が子マスク及び試料の露光に使用される。基本構成は、図 1 に示した構成及び上記の文献 1 に開示された構成に類似した構成を有するので、図 1 と同一の機能部分には同一の参照番号を付して表す。

- 15 図 3 に示すように、電子光学鏡筒 10 には、電子ビーム 15 を発生する電子銃 14、電子ビーム 15 を平行ビームにする照射レンズ 18、主偏向器 20、及び副偏向器 50 が設けられている。主偏向器 20 と副偏向器 50 は、図 3 ではそれぞれ 1 つの偏向器として示してあるが、実際には図 1 に示したようにそれぞれ 2 段構成になっている。真空試料室 8 には、マスク 30 を保持して移動するマスクステージ 36、及び子マ
20 スクの材料又は試料に相当する基板 121 を保持して移動するステージ 131 が設けられている。

図 3 では、主偏向器 20 で平行ビーム 15 のマスク 30 上の照射位置を変化させた状態を示す。図示のように、主偏向器 20 で照射位置を変化させても、電子ビーム 15 はマスク 30 へほぼ垂直に入射する。

- 25 以上、第 1 の実施の形態の電子ビーム近接露光装置の構成を説明したが、基本構成は文献 1 や米国特許第 5,831,272 号に開示された構成とほぼ同じであり、ここではこれ以上の詳しい説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

図 4 (A) 及び 4 (B) は、それぞれマスクの平面図及び断面図である。マスタマスク 111 と子マスク 30 は同一の形状を有し、同一の材料で作られる。図 4 (A)

及び4 (B) に示すように、マスク30は、例えば厚さ数mmの薄い板状の部材で、中心部の参照番号32で示す部分が数 μ mの厚さに加工されており、その中の参照番号33で示す部分に開口パターンが形成される。参照番号35は、マスクの位置を検出するためのマークである。

- 5 図5 (A)、5 (B)、5 (C) 及び5 (D) は、マスタマスクから子マスクを製作する本発明の実施の形態のマスク製作方法を説明する図である。ここでは図1に示した電子ビーム近接露光装置と同じ装置を使用して露光を行うものとする。

図5 (A) に示すように、マスク30としてマスタマスク111を装着する。マスタマスク111は、どのような方法で製作されてもよいが、例えば、マスクの基板上に塗布したレジストに、従来の電子ビーム露光装置を使用して所望のパターンを露光した後、現像及びエッチングなどの処理を行うことにより製作できる。次に、第1面にレジスト層122を形成した子マスク用の基板121を、電子ビーム近接露光装置のステージ131上に固定し、マスタマスク111に近接するように配置する。この状態で、電子ビームを照射してマスタマスク111の開口パターンに対応するパターンを露光する。

その後、レジストを現像して開口部のレジストを除去し、更に第1面をエッチングして図5 (B) に示すような穴123を形成する。この穴は開口パターンに対応し、その深さは最終マスクの厚さ (図4 (A) で参照番号32で示す部分の厚さ) より若干深くなるようにする。

- 20 次に、図5 (C) に示すように、第2面の図4 (A) で参照番号32で示す部分に対応する以外の部分にレジスト層124を形成し、第2面をエッチングして参照番号125で示す部分を最終マスクの厚さにする。これにより、図5 (B) の開口部123は貫通し、開口パターンが形成される。これにより、図5 (D) に示すように、子マスクが形成される。

- 25 ここで、図5 (A) に示すように、マスタマスク111のaとbで示す部分は、それぞれ子マスク121のa' とb' で示す部分に対応する。子マスクを使用する状態では、子マスクは反転されるので、a' とb' は図5 (D) に示すように左右逆転する。すなわち、図5 (A) と図5 (D) とを比較すると、マスタマスクと子マスクのパターンは、同一ではあるが左右逆転していることが分かる。そこで、マスタマスク

にパターンを露光する時には、この点を考慮してパターンの方向を決定する必要がある。例えば、マスタマスクも、図5（A）～5（D）で示すように、マスタマスクの基板の第1面にレジスト層を形成し、それにパターンを露光して開口に対応する穴を形成した後、第2面を最終マスク厚までエッチングする場合、マスタマスクのパターンは左右反転される。このマスタマスクから複製した子マスクのパターンも左右反転するので、子マスクのパターンは最初にマスタマスクの基板に露光したパターンと同じであり、反転していない。従って、マスタマスク用のパターンは、試料に露光するパターンと同じ非反転のパターンを露光すればよい。

上記のように、本実施の形態では、マスタマスクを使用して子マスクのパターンを露光し、子マスクを使用して試料への露光を行う。しかし、マスタマスクの使用回数をできるだけ低減するため、マスタマスクを使用して露光することにより製作した1代目の子マスクをマスタマスクとして2代目の子マスク（孫マスク）を製作し、更に2代目の子マスクをマスタマスクとして3代目の子マスク（曾孫マスク）を製作するという具合にして更なる子マスクを製作し、その更なる子マスクを使用して試料への露光を行うようにしてもよい。これにより、露光する回数が非常に多いマスクの場合でも、マスタマスクを使用しての露光回数は少なく、マスタマスクを損傷する可能性は大幅に低減される。この場合には、マスタマスク及び子マスクの露光時にパターンが左右反転するので、マスタマスク又は子マスクから子マスクを製作する工程数を n 回とした時には、最初のマスタマスクの露光を含めて $n+1$ 回の露光、すなわちパターンの反転が行われることになる。したがって、 $n+1$ が奇数の時には、マスタマスクに露光するパターンは試料上のパターンを左右反転したパターンとし、 $n+1$ が偶数の時には、マスタマスクに露光するパターンは試料上のパターンの非反転のパターンとする。

電子ビーム近接露光用マスクは、数十mm×数十mmの大きさの数 μm あるいは1 μm 以下の厚さの非常に薄い膜であるが、非常に高い膜の平面度が要求される。そこで、図6に示すように、マスクの薄膜33の表面に収縮する方向に力が働くような材料でマスクの薄膜33を形成する。例えば、Si（ウエハ）を窒化してSiNの薄膜部を形成する。その結果、マスクの周囲の厚い部分34から薄膜33の部分を引っ張る応力がかかるようにして、高い平面度が得られるようにしている。しかし、薄膜3

3には開口38が形成されており、開口38のパターンは部分的に異なるため、応力の分布に部分的に差が生じ、マスクの薄膜33に歪を生じる。

前述の文献1及び米国特許第5,831,272号は、電子ビーム近接露光装置において、マスクに照射する電子ビームの方向を変化させてマスクの歪を補正する技術を開示している。本実施の形態のマスク製作方法では、この技術を利用して歪を低減したマスクを製作する。

図7は、上記の文献に開示されたマスクの歪を補正する技術を説明する図である。

主偏向器20の偏向量を変化させて平行ビーム15のマスク30上の照射位置を変化させると、図3に示すように、電子ビーム15はマスク30へほぼ垂直に入射する。

これに対して、副偏向器50で平行ビーム15のマスク30への入射角を変化させると、図7に示すように、電子ビーム15はマスク30の同じ位置に入射するが、入射角は変化する。入射角が変化すると、マスク上の同じ位置を通過した電子ビームでも、基板121上の照射位置が変化する。この変化量は、マスクと基板との間隔と入射角との積である。従って、あらかじめマスク30の歪を測定しておき、入射角による照射位置の変化が歪量と同じで逆の方向になるように入射角を設定すれば、マスクの歪を補正することが可能である。

マスクを走査する電子ビームを小さくすれば、理論的にはどのような歪も補正できるが、スループットの点から電子ビームはある程度の大きさを有することが望ましく、その場合にはあまり大きな歪は補正できない。また、歪は非線型であっても補正可能であるが、ここでは副偏向器の制御を容易にするために、図8に示すように、歪は線型であると仮定して補正を行う例を説明する。

図8に示すように、マスタマスクを露光する時には、P1～P4の点はそれぞれ理想的な位置に露光される。しかし、開口に相当する穴の形成及び薄膜部分の加工により、実際に製作されたマスタマスクでは、P1の点はP1'に、P2の点はP2'に、P3の点はP3'に、P4の点はP4'に形成されていたとする。これは、元の理想的XY座標が、実際には歪んだxy座標に線型変換されたものと考えることができ、歪んだxy座標を元の理想的XY座標に補正するには、次のような変換式で線型変換を行えばよい：

$$X = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y + a_4 \cdot xy$$

$$Y = b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot y + b_4 \cdot x y$$

ここで、 $a_1 \sim a_4$ 及び $b_1 \sim b_4$ はマスク歪の補正係数である。

補正係数 $a_1 \sim a_4$ 及び $b_1 \sim b_4$ は、上記の変換式に $P 1' \sim P 4'$ の座標値及び $P 1 \sim P 4$ の座標値を代入した方程式から求めることができる。

- 5 上記のような変換式から算出したマスク上の各点の補正量に対応して入射角を決定し、更に副偏向器の偏向量を決定して露光を行えば、たとえマスタマスクが歪んでいても、子マスクの基板に歪のないパターンを露光することが可能である。

しかし、上記のように子マスクの基板に歪のないパターンを露光しても、子マスクに加工した時には歪が生じることが予想される。上記のように、歪は主として薄膜及び応力用薄膜の部分的な開口パターンの差から生じているので、再現性があると予測される。そこで、一度歪のない開口パターンを露光して子マスクを製作し、その歪を測定すれば子マスクで生じる歪が分かる。そして、マスタマスクを使用して子マスクを露光する時に、マスタマスクの歪に加えて子マスクで生じると予測される歪も合わせて補正すれば、最終的に得られる子マスクは歪のない開口パターンを有することになる。

- 10 マスタマスクと子マスクが、同一材料で同一形状で作られる場合には、マスタマスクの歪と同じ歪が子マスクに生じると予測できる。そこで、図 9 に示すように、 $P 1' \sim P 4'$ の座標点が $P 1 \sim P 4$ になるように変換するのではなく、例えば、補正量を 2 倍にして $P 1' \sim P 4'$ の座標点が $P 1'' \sim P 4''$ になるように変換する。これにより子マスクの基板には逆方向に歪んだパターンが露光されることになるが、この歪は子マスクを仕上げ加工するときに発生する歪と相殺するので、結果として歪のない理想的なパターンの子マスクが得られる。

- 15 以上説明したように、本発明によれば、一度マスタマスクを製作すれば、実際の試料の露光で使用するマスクを容易に低コストで製作することが可能であり、マスクの
25 耐久性が短くても半導体装置の製造コストに与える影響を低減できる。更に、歪の補正が可能な電子ビーム近接露光方法でマスタマスクからマスクを複製するので、最終的に得られるマスクはマスタマスクより歪の少ない高精度のマスクとなる。

It should be understood, however, that there is no intention to limit the invention to the specific forms disclosed, but on the contrary, the invention is to cover all modifications,

alternate constructions and equivalents falling within the spirit and scope of the invention as expressed in the appended claims.

OFFICE OF THE SECRETARY